

1. はじめに

宇宙環境の代表的な特徴として、無重量空間であることがあげられる。このことは、さまざまな密度の違う物質を分離する浮力が存在しないということである。したがって、異なる物質を均一に混ぜる、あるいは自然対流を抑制して拡散支配の現象を実現するなど、材料合成の分野において有効利用できることが期待されている。この反面、密度の違いによって分離が起こらないことは、宇宙環境を利用する際に困難をもたらすことも意味する。たとえば燃料タンクの気液分離が難しいとか、宇宙船内で電線が過熱し易いといった例である。他にも、地上の生活で何気なく使っているものに目を向けてみると、ろうそくが燃え続けるだとか、鍋でぐつぐつ煮ておいしい料理ができるとか、浮力がないと実はできないことというのが多いことに気づかされるものである。無重量空間で浮力の代わりにする力があればどんなに使い道があるか計り知れない。逆に、浮力と同じ性質の力が出せるなら、地上で浮力を抑制することもできるのである。

重力の代わりに浮力の駆動力となるものとしては、遠心力が一般的に知られている。軌道上での無重量を遠心力と重力の釣り合いだと説明することができるように、両者は同じ扱いが可能である。ただし、遠心力を使って浮力を制御する方法にも欠点はある。十分な力を出せる回転運動機構の小型化は難しく、宇宙での利用は限られる。また、地球の重力を相殺する遠心力を得るためには地球の重力中心を通る軸周りに回転させざるを得ない。地上の装置ではこれは無理であるから、地上では遠心力を使って定常的に重力を相殺することはできない。

我々は公募地上研究を中心として実施した燃焼振動の研究で、定在音場中では無重量場においても熱対流が発生することを発見した⁽¹⁻⁴⁾。この熱対流が一種の音響流であり、熱発生に伴う密度変化で発生することから、熱音響流と呼ぶことにした⁽⁵⁾。この熱音響流の駆動力は振動流がもたらすレイノルズ垂直応力であると考えられ、性質として密度差に比例した力が出ることから、自然対流と似た性質を持つことが確認できている⁽⁵⁻⁷⁾。このことから定在音場を利用すれば宇宙空間で遠心力を用いなくても自然対流に似た熱対流を作り出せることがわかった。研究としてはまだ始まったばかりであるが、基本的なモデル作りができ、利用への一歩が踏み出せたと考えている。ここでは、この熱音響流の発現例と発生モデルを紹介する。将来的な応用の参考になれば幸いである。

2. 燃焼振動に関する微小重力実験

2.1 燃焼振動問題

ガスタービンやロケットエンジンの燃焼器のように、連続燃焼の定在火炎を用いる燃焼器において、燃焼器内で音響振動が発生すると、局所的に燃焼が活発になり、また、熱伝

達が促進されて、燃焼器の壁面を損傷することがある。このような強い音響振動は、燃焼器内部での音響学的共鳴と燃焼との相互増幅の条件が満たされるときに発生する。

燃焼と音響振動との共振のしくみの例として以下のようなものが考えられる。

1. 音響振動によって燃料供給が振動し、燃焼振動を誘発。これが圧力波を生じ、音響振動をさらに強める。
2. スワロー等の保炎器からの渦が音響振動を発生する。
3. 音による圧力上昇時に活発な熱発生、下降時に緩慢な熱発生となることによってエンジン同様の熱サイクルを構成し、音響振動を強める（レイリー条件）。
4. 音響振動が定在波を形成するとき、定在音波の特定の位置で活発な熱発生が起こると自励振動が起きる（熱音響現象）。

これらに起因する燃焼振動を防止する対策は以下のものが考えられる。

1. 燃料供給系の共振周波数を調整する。（燃焼室・燃料管の長さ、噴霧粒径）
2. 渦の安定条件をみたく。（燃焼ガスを中央に集める、外側ほど強い旋回など）
3. 燃焼の圧力依存性を調整する。（燃料・粒径）
4. 燃焼器内部での熱発生分布を調整する。（火炎の長さを伸ばすなど）

このほかに、一般的に適用できる方法として、

5. 燃焼器内にバツフルプレートや、キャビティを設けて燃焼器の共鳴を発生しにくくする。

といった方法がある。現実の燃焼器の振動対策としては、発生原因が不明でも効果が期待できる方法である5が最も汎用性がある。設計段階で予測できない振動が発生してしまった場合には、改造が少なく済む1が適用されることも多い。2, 3, 4については燃焼と音響振動との直接の干渉が原因であるため、燃焼状態そのものを変える必要があることと、干渉効果を定量的に理論予測することは困難であるため、具体的な対策法は未発達である。最新の基礎研究の結果を見ると、2の対策は例えばTube状火炎で、3は圧力変動中の液滴の着火遅れを調整することなどで対応できると思われるが、4の熱発生分布については、与えられた熱発生分布から音響振動の発生を予測する手法は発達しているが、音響振動場が熱発生分布をどう変えるかというフィードバック過程についてはまだ未解明である。燃焼器内部に発達した定在音波の腹・節とその中間といった、位置による燃焼促進の違いがどのようなものかさえ予測は困難である。その結果、火炎構造の変化まで含めた音場と燃焼場との相互干渉の予測はできていない。これを明らかにすることが研究の出発点であった。

2.2 定在音場での燃焼促進のしくみ

燃焼が促進されるのは化学反応が活発になるか、熱や反応物質の火炎への供給が活発になるかのいずれかによる。音そのものが化学反応を促進するのは、液体中での強力超音波を除いて知られていない。一方、音による熱・物質伝達の促進は広く認知されており、熱交換器などで一部実用に使用されてもいる。音場で燃焼が促進されるのは、音の持つ伝達促進効果に起因すると考えられる。伝達促進は主に対流によって引き起こされるが、音は波であり、振動流（往復流）を伴うことから、これが燃焼促進の上で最も重要であると考えられていた。液体燃料を燃やす場合の往復流による燃焼促進のイメージを図1に示す。往復流によって火炎は左右にゆすられて、液滴からの燃料の蒸発を促進し、燃焼が活発になるとというのが従来の考え方である。

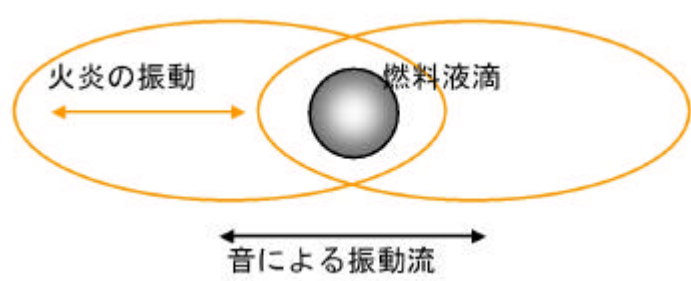


図1. 音による燃焼促進モデル

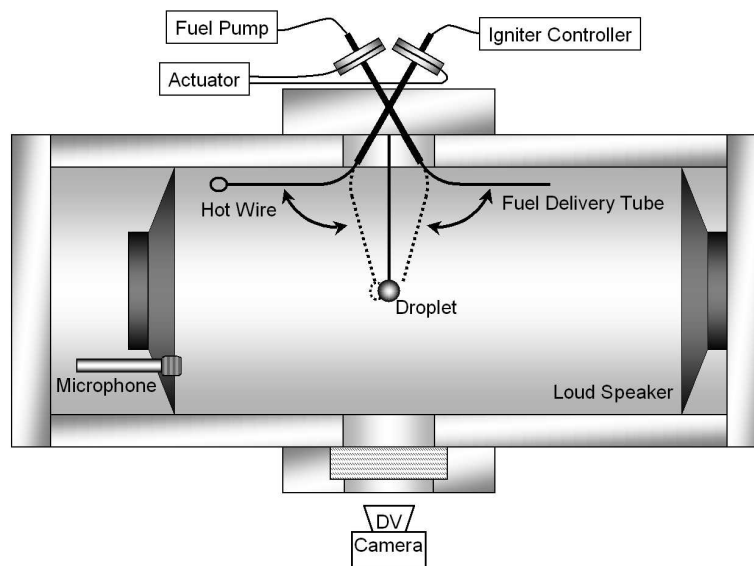


図2 実験装置模式図

定在音場の様々な位置での燃焼促進効果を定量化するために、図2のような装置を製作し、日本無重量総合研究所(MGLAB)にて微小重力実験を行った。装置は、高压容器内部

に向き合わせて設置された2つのスピーカから定在音場を生成するようになっており、この間の任意の場所において直径約 1.5 mm の燃料液滴を燃焼させてその燃焼速度を計測する。燃焼中の火炎はデジタルビデオカメラで撮影しており、火炎の様子から音と燃焼が干渉する場合の流れが計測できる。

このような装置を用いて定在音波の腹と節、その中間において液滴を燃焼させた際の火炎の様子を図3、4に示す。図3からわかるように、速度振動の腹と節においては、火炎はほとんど流されないが、その間で燃える場合には、節に向かって流されていることが解る。図4に見られるように、静止雰囲気中では無重量場での典型的な火炎形状である球状火炎となっているが、音場では火炎は常に節のほう（この図で左方）に向かって流され、その流れの向きが変わることはない。従来の理論では、火炎は左右に振動し、非常に激しい動きをするはずであったが、実際に観測された火炎は常に速度振動の節に向かって一様に流されていたのである。この一様流はこれまでの理論では説明できないものであり、かつ、火炎の形を支配していることから、燃焼促進に関しても、この流れが支配的であることが容易に推測できる。従来の往復流が現象を支配するという音場と燃焼の干渉モデルが成り立たないことが判明したのである。

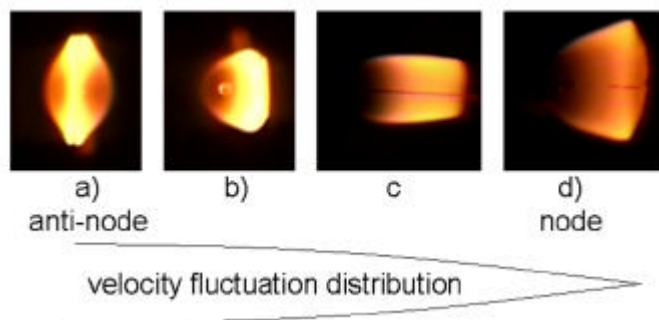


図3 定在音場中の異なる場所での火炎の様子⁽²⁾



図4 定在音場中の火炎の時間変化（左が節の方向）

観測された火炎を速度振動の節に向かって流している対流のことが、熱音響流と名づけた対流である。音場で発生する対流は一般的に音響流と呼ばれているが、今回の流れは、熱発生があった場合にのみ発生することから、熱という言葉をつけ加えて名づけたものである。図3，図4より、熱音響流は、腹と節の間で最も強くなる、音圧を上げると流れが強くなるという性質が判明した。この熱対流の発生機構と性質について実験データを元に次章で考察してみる。

3. 熱音響流の性質

この音場と熱発生により引き起こされる熱対流の駆動力をレイノルズ垂直応力であるとすると、観察された性質をうまく説明できる。応力を体積積分した値として導かれる一種の音響放射力が駆動力であると言い換えることも出来る。両者に本質的な違いはない。レイノルズ垂直応力はナビア・ストークス (NS) 方程式に含まれる移流項により生じる。概説すると、この移流項は式では、

$$u \frac{\partial u}{\partial x} \quad \text{と表現されている。}$$

このうち流速 u は音響振動場では、平均流 \bar{u} と音響振動成分 u' とに分解できる。すなわち、 $u = \bar{u} + u'$ を代入して音響振動の1周期の平均を取ると、

$$\overline{(\bar{u} + u') \frac{\partial (\bar{u} + u')}{\partial x}} = \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \overline{u' \frac{\partial u'}{\partial x}} \quad \text{となる。}$$

ここで大切なことは、音響振動の1周期で平均しても上式右辺第2項が0とはならないことである。NS方程式のその他の項については、1周期平均することで振動成分 u' の影響を取り除くことが出来るが、移流項は流速に関して非線形であるために影響を受けるのである。この第2項に密度をかけたものがレイノルズ垂直応力を表すことになる。実際の3次元流れにおいては、レイノルズ応力はテンソル量であり、せん断応力も存在するが、定在音場のように特定方向の振動だけが卓越する状況においては、適当に座標を選ぶと特定方向の1成分だけが卓越することになるから、結局上記のレイノルズ垂直応力でも十分に性質を説明できるはずである。また、検査体積をとって応力を積分し、一種の音響放射力として表すと、次の近似式で書ける。

$$F_R = \rho V (\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_0) g_a$$

ここで、 F_R を音響放射力とし、 V は燃焼ガスの体積、 \mathbf{r}_s 、 \mathbf{r}_0 はそれぞれ燃焼ガスと周囲

空気の密度である．また， g_a は音による速度振動の 2 乗の時間平均の空間勾配であり，加速度の次元をもっている． g_a は形状や音場の歪み等の影響を含む修正係数とする．ここで， g_a は別な見方をすれば，振動の持つ運動エネルギーの空間勾配とも言える．この熱対流の駆動力が生じる説明する際に，定在音場がもつ振動の運動エネルギーが，時間平均的な運動を解く場合に，一種のポテンシャルエネルギーとして扱えば良いということでもある．

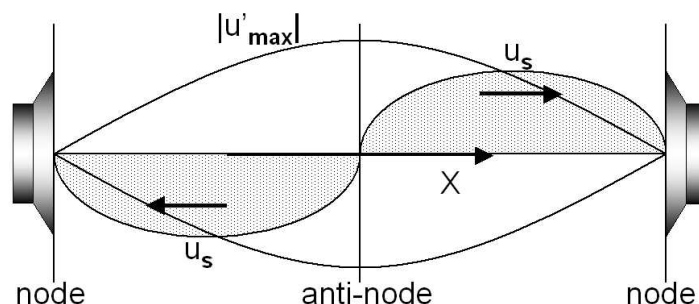


図 5 熱音響流の分布

この g_a の大きさ・正負から考察すると，周囲に比べて密度の低い物質により生じる熱音響流は模式的に図 5 の u_s で表せる分布となる．実験で観測されたのと同様に，腹と節との丁度中間で最大の強さとなる．腹から節に向かって燃焼ガスが流れた事実を説明できる．

音響放射力の式は密度差・体積・加速度に比例しており，式表現上，重力による浮力の式と同一である．すなわち，熱音響流が自然対流と同じ性質を持った流れであることが予測されるのである．違いは，音響放射力の場合，加速度項は振動エネルギー勾配である g_a であるが，重力の場合はこれが g （重力加速度）に入れ替わるだけである．重力の存在しない宇宙空間においても自然対流と同じ性質を持った熱対流を作ることができるわけである．ちなみに，音場で $g_a = 1 g$ 相当の加速場を実現するには雰囲気圧が 1 気圧で，音響周波数が 1 kHz の時に，145 dB 程度の強い音場が必要である．また， g_a は定在波中の場所によって大きさが異なることにも注意が必要である．音の波長に比べて十分に小さいスケールで起こる現象であれば，重力加速度と同じ効果が期待できる．

このように熱音響流の発生機構を解析し，その基本的性質を説明することができたので，熱音響流が自然対流と同じ作用をもたらすかどうかの確認として燃焼促進に与える音場の影響を実験的に評価した．

自然対流の輸送特性を議論する際にはグラスホフ数 ($Gr = \text{浮力} / \text{粘性力}$) という無次元数が用いられ，無対流時の燃焼速度 (k_0) からの対流発生時の燃焼速度 (k) の増加分すなわち，燃焼促進率 ($k/k_0 - 1$) についてもグラスホフ数で整理されている．これに習い，熱音響流では音響グラスホフ数 ($Gr_a = \text{音響放射力} / \text{粘性力}$) という無次元数を新たに作れば，これによって燃焼促進率を見積もることが可能となるはずである．自然対流の場合

では、対流が弱い場合には燃焼促進率はグラスホフ数の 0.5 乗に比例し、強い場合には 0.25 乗に比例することが知られており、既の実験で検証されている。微小重力実験により熱音響流の場合について同様の関係が検証できれば、熱音響流が燃焼促進に果たす役割が自然対流のそれと同様であることが確かめられる。

図 6 に MGLAB での微小重力実験で得られた燃焼促進率を示す。過去の自然対流に関する実験データも中黒のマークでプロットしてある。音場での燃焼促進は、重力場での燃焼促進の傾向と一致しており、予想どおりの結果である。熱音響流の性質が自然対流に似ているとする解析と、それによる伝達促進が燃焼促進を支配的とする燃焼-音場干渉モデルの妥当性を証明することとなった。

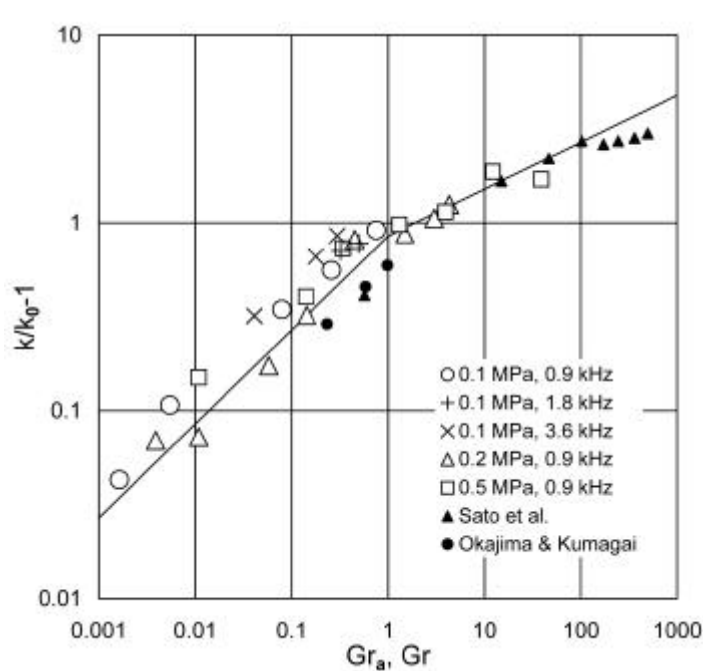


図 6 燃焼促進率の音響グラスホフ数依存性⁽⁷⁾

4. 数値モデル化

熱音響流という音場で発生する熱対流の発生機構は NS 方程式に含まれている。このため、乱流が発生しない流速の範囲においては、通常の層流シミュレーション用の数値解析で計算できるはずである。ただし、この場合にも、音響振動による流速変動を追跡する必要があるため、数値積分のタイムステップは音響振動の周期よりも 2 桁程度短く取る必要がある。このような計算では、正確な現象が再現できる代わりに、非常に大きな CPU コストが必要である。例えば、1 kHz の音場を層流で流れる熱音響流を 1 秒間シミュレーションするのに 10^5 回程度のタイムステップを刻まなければならない。非効率的な方法である。音響振動の時間スケールと時間平均流れである熱音響流の時間スケールが大きく異なることが問題点である。このステイフネスを回避するためには、NS 方程式の時間平均化を行ったレ

レイノルズ方程式で熱音響流を再現する方法が有効である．この方程式を解くにはレイノルズ応力の算出が必要となるが，幸いにも定在音場では，特定方向の振動成分が卓越しているため，1次元のレイノルズ垂直応力に相当する g_a をこれに充てることができる．このように音響振動場がもたらす駆動力を外力的に扱うことで，音響振動を時間分解して計算しなくても熱音響流を再現できるモデルが出来上がる．見かけ上，音響放射力が外力として加わることから，この計算方法を ARF (Acoustic Radiation Force Model) モデルと呼ぶ^(8,9)．これに対して，以下では前述の高時間分解能の数値計算を DNS (Direct Numerical Simulation) と呼ぶ．時間軸方向のフィルタリングがないという意味でこう呼ぶが，空間軸のフィルタリングとは無関係であり，乱流計算の分野での DNS よりも粗い定義である．

本来，燃焼場での熱音響流の再現には化学反応をも計算に含める必要があるが，計算の複雑さを避けるために，液滴燃焼に伴う現象のうち温度上昇のみをモデル化する．すなわち，定在音場内のある点において液滴が燃焼して発生する燃焼ガスの流れを，同じ点において気体を電熱線で加熱し，温度上昇させることで密度の低下した気体をつくることにより模擬し，熱音響流の再現を試みた．本計算においては，計算コードには FLUENT を用い，音響周波数 900 Hz において直径 2 mm の空間を局所加熱し，2000 K に保って，流れ場の発達を計算した．DNS では音の 1 周期内に十分な時間分解能を有するようにタイムステップは約 10^{-5} s とした．

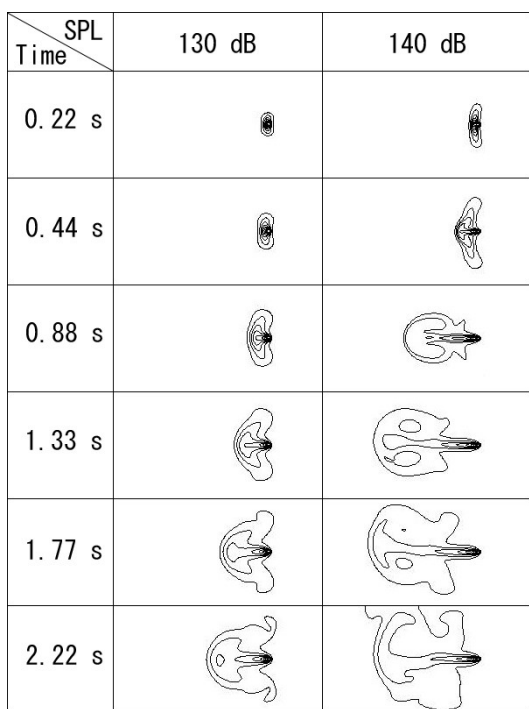


図7 熱音響流の発達過程(等温度線図DNS)

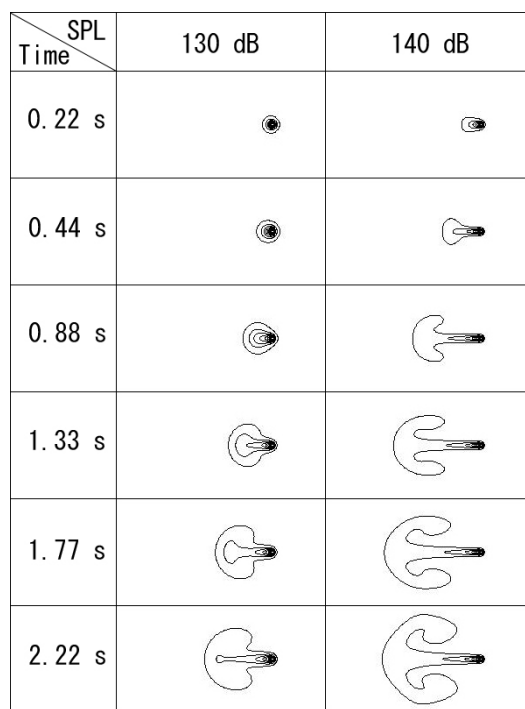


図8 熱音響流の発達過程(等温度線図ARF)

音圧 130, 140 dB の時の加熱開始直後からの熱音響流の発達の様子を等温度線図で図7に示す．この図において，左右の端が定在音場の速度振動の腹であり，中央が節である．加熱場所

は腹と節の丁度中間点（図で等温線が最も密になっている場所）としており，最も強いレイノルズ垂直応力が生じる場所である．図に見られるように 130 dB の場合には比較的弱い流れが中央の節に向かって生じている．140 dB の場合には流れは節を通り越して流れており，2.22 s にはこの節を通り過ぎた流れが再循環している様子が見て取れる．熱音響流は DNS で再現でき，その流れは温められた気体を定在波の節へと向かわせることが確認できた．このことにより，熱音響流の発生機構は NS 方程式に内包されていることが確認できた．

ARF モデルではレイノルズ方程式に前述のレイノルズ垂直応力を考慮して計算することで，時間平均化された流れ場を計算することが可能となる．すなわち，

- 1．ある時点における流れ場に定在する音場を求める．
- 2．速度振動の空間分布よりレイノルズ応力を求める．
- 3．レイノルズ方程式を解く

をタイムステップごとに繰り返すことで定在音場と流れ場との干渉を数値計算に盛り込むことが出来る．ここでは，時間ごとの音場の計算を省くために，音場を 1 次元と仮定し，さらに温度上昇による物性の変化を無視した場合の解を利用し，修正係数を加えて近似的にレイノルズ垂直応力を与えるという簡易解法をとった結果を紹介する．定在音場における速度振動の空間分布からレイノルズ垂直応力 を計算すると，

$$\mathbf{r} \frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} = \mathbf{r} \frac{\rho \cdot u'_{\max}{}^2}{l} \sin\left(\frac{4\rho}{l} x\right)$$

で表せる．ただし， l は定在音波の波長である．ここで，速度振幅の最大値である u'_{\max} は音圧 SPL に依存する．これに実験により求めた修正係数 0.54 を乗じてレイノルズ方程式を解いた結果を図 8 に示す．

ARF モデルでも熱音響流を再現できることが示されている．時間平均化された流れ場であるため，また音響振動場が 1 次元近似であるために DNS と若干の違いがあるものの，音圧による流れの変化，各時間での温度場の広がり，循環流など，比較的流れ場をよく再現できていることがわかる．このモデル化では CPU コストは DNS 比で約 1/1000 である．この ARF モデルは式の上では重力加速度項を音による運動エネルギー勾配で入れ替えただけであるから，この熱対流の駆動力が本質的には浮力と同様の性質をもつことは妥当であると考えられる．

5．まとめ

定在音場で熱発生があった際に生じる熱音響流が自然対流に非常によく似た性質を持つことが，実験的に示され，それに基づいて，あらたにこの対流のモデル化を行うことで，

数値計算上である程度の再現が可能となった。ここに紹介した音場を利用した熱対流の生成とその解析は、燃焼振動の1要因の解析に過ぎないが、その性質を理解することで、将来的には無重量空間での熱対流として有効利用も可能であると考えられる。遠心力を使わず、音場の持つ速度エネルギーの不均一を利用することによって、あたかも、重力場のよう熱対流を生成できる。また、この熱対流では、密度差を利用して物質の分離を行うだけでなく、密度の小さいものを速度振動の節に、密度の高いものを腹に集めて保持することができる。

この熱音響流の実験とモデル化により得られた知見は、もう一步踏み込んで一般化して考えることも出来る。即ち、自然対流のような対流は、流体の持つエネルギーのうち、ポテンシャル扱いの出来るエネルギーが運動エネルギーに変換されて発生すると解釈してよいから、如何に重力場に相当するポテンシャルエネルギー場を与えるかが宇宙空間における対流生成の鍵である。今回のテーマである熱音響流では定在音場のもつ振動運動エネルギーがその役割を担っている。これは、例えば電磁場であっても特殊な流体であればそれによるエネルギー勾配を駆動力として対流が起こせるという事実にも当てはまる。どのような形態のエネルギーが任意に分布可能で、対流の駆動力源として利用できるかを考えていくことで、重力場に相当する場をつくり、宇宙で流体を自由に扱う、あるいは、地上で重力の影響を抑え込む方法が考え出せるのではないだろうか。

謝辞

本稿に紹介させていただいた研究は、青木清教授(日本大学)、桑原卓雄教授(日本大学)、河野通方教授(東京大学)、藤森俊郎氏(IHI)、佐藤公美氏(IHI)と多数の学生達の協力のもとに遂行されたものであり、ここに感謝の意を表します。また、この研究の一部は(財)日本宇宙フォーラムが推進している「宇宙環境利用に関する地上研究公募」プロジェクトの一環として行ったものであります。

参考文献

1. Influence of Acoustic Field on Droplet Combustion in Microgravity, Tanabe, M., Aoki, K., Sato, K. and Fujimori, T., NASA/CP-1999-208917, 1999.
2. Influence of Standing Sound Wave on Droplet Combustion, Tanabe, M., Morita, T., Aoki, K., Satoh, K., Fujimori, T. and Sato, J., Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 28, p.1007, 2000.
3. Combustion of Isolated droplet in Standing Sound Wave, Morita, T., Tanabe, M., Aoki, K., 4th JSME-KSME Thermal Engineering Conference, Vol. 1, p. 103 2000.
4. Effects of Standing Sound Wave on Droplet Combustion, Morita, T., Aoki, K., Satoh, K., Fujimori, T. and Tanabe, M., Microgravity Science and Technology, XIV/2, p.29, 2003.

5. Evaluation of Combustion Enhancement by Standing Sound Wave Using Microgravity, Tanabe, M., Kono, M., Sato, K., Fujimori, T. and Aoki, K., Proceedings of The 23rd ISTS (Selected Papers), Vol. 2, p. 1662, 2002.
6. 定在音場と液滴燃焼との干渉 (熱音響流の発生と燃焼促進), 田辺光昭, 桑原卓雄, 藤森俊郎, 河野通方, 日本機械学会論文集 B編, 69巻 688号, p. 126, 2003.
7. Droplet Combustion in Standing Sound Wave, Tanabe, M., Kuwahara, T., Satoh, K., Fujimori, T., Sato, J. and Kono, M., Proceedings of the Combustion Institute, Vol.30, No. 2, p. 1957, 2004.
8. Analysis on thermo-acoustic streaming field by CFD simulation, Tachi, k., Kuwahara, T., Tanabe, M., Proceedings of The 24th ISTS (Selected Papers), p.787, 2004.
9. 熱音響流の数値モデル化, 舘和岳, 桑原卓雄, 田辺光昭, 日本マイクロ重力ティ 応用学会誌, Vol.22, No. 1, p. 42, 2005.